

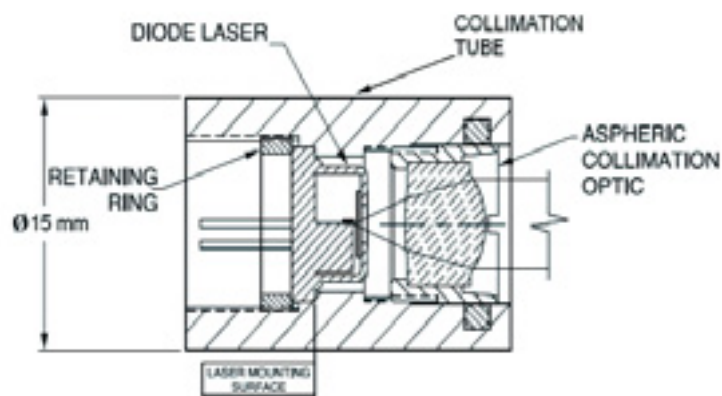
Controllo delle superfici di prodotti in pietra naturale

di Michele Lanzetta, Giovanni Tantussi
Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Nucleare e della Produzione
Università degli studi di Pisa, Italia

1. BASE DI PARTENZA SCIENTIFICA NAZIONALE O INTERNAZIONALE

Se si esaminano i dati statistici relativi alla lavorazione di materiali lapidei e alla produzione di macchinari con particolare riferimento allo sbilanciamento tra esportazioni e importazioni, emerge chiaramente la leadership tecnologica del nostro paese a livello mondiale. L'enorme crescita della concorrenza soprattutto ad opera dei paesi emergenti impone, però, di adottare politiche di innovazione atte a mantenere tale ruolo per il sistema paese. La visione artificiale è nata con la robotica negli anni settanta e si è sviluppata in maniera crescente nel campo della robotica industriale e dell'automazione negli ultimi due decenni. Le prime massicce applicazioni sono avvenute nell'industria elettronica. Con la rapida evoluzione delle tecnologie dell'informazione, questi sistemi

stanno diventando sempre più interessanti per un numero crescente di applicazioni industriali e, oggi, rappresentano un settore di punta nel campo della produzione. Tra i sensori impiegati nell'industria, i sistemi di visione artificiale sono quelli di impiego più generale e sono strumenti flessibili che possono automatizzare con successo una delle più potenti capacità sensoriali dell'uomo. Vengono impiegati favorevolmente nella maggior parte delle operazioni produttive per controllo (ad esempio in ausilio di robot) e controllo di qualità (ad esempio per verificare la correttezza e correggere il risultato di operazioni precedenti). Tra le principali funzioni di tipo visivo vi sono: riconoscimento, misura, localizzazione e inseguimento. Nel montaggio, che rappresenta circa l'80% di tutte le operazioni industriali, i sistemi di visione sono correntemente utilizzati per rilevare presenza / assenza, identificazione, corretto assemblaggio, incol-



Schema tecnico del riflettometro sviluppato
Scheme of the developed reflectometer

SURFACE CONTROL OF NATURAL STONE PRODUCTS

by Michele Lanzetta, Giovanni Tantussi
Department of Mechanical, Nuclear and
Production Engineering
University of Pisa, Italy

industrial robotics and automation over the last two decades. The first large-scale applications were made in electronics industry. With the rapid evolution of information technology, these systems are becoming more interesting for a growing number of industrial applications and today they represent an important factor in production activities. Among the most used sensors in industry, artificial vision systems have a more general use and are flexible tools able to successfully automate one of the most powerful sensory capabilities of man. They are used favourably in most manufacturing operations for control (e.g. using robots) and quality control (e.g. to check accuracy and correct the result of previous operations). Among the main visual functions we include: recognition, measurement, localization and tracking. In the assembly, which represents about 80% of all industrial operations, vision systems are currently used to detect the presence / absence, identification, proper assembling, gluing and sealing and quality control,

1. NATIONAL AND INTERNATIONAL SCIENTIFIC BACKGROUND

Examining the statistics related to the processing of stone materials and the manufacture of machinery, with special reference to imbalance between exports and imports, it is clear the worldwide technological leadership of our country. However the enormous increasing competition, especially by emerging countries, requires to adopt innovative approaches in order to keep this leading role. Artificial vision was born together with robotics in the seventies and it has increasingly developed in the field of



laggio, sigillatura e controllo di qualità, che è una delle più diffuse applicazioni sia in campo meccanico, sia elettronico. Attualmente, la frontiera nel campo della ricerca sulle applicazioni dei sistemi di visione è rappresentata da:

- studio di sistemi integrati, per ridurre la complessità dell'hardware incorporando sempre maggiori funzioni a bordo dei sensori;
- miniaturizzazione, per aumentare la versatilità delle applicazioni nel caso di esigenze di ingombro limitato;
- visione tridimensionale (3D), la maggior parte delle applicazioni industriali sono di tipo 2D e non esistono ancora algoritmi consolidati che risolvano definitivamente il problema, né tantomeno prodotti commerciali;
- applicazione a lavorazioni non tradizionali. Nel campo della ricerca, come in campo industriale, oggi la potenza disponibile consente l'implementazione di algoritmi più complessi che permettono di trattare la variabilità e imprevedibilità dei prodotti naturali.

È in quest'ultimo settore che si colloca la ricerca affidata all'Unità di Pisa. I problemi aperti riguardano essenzialmente la definizione di parametri oggettivi che possano essere correlati con i risultati delle lavorazioni superficiali su materiali lapidei, e lo sviluppo dei metodi per la loro determinazione sperimentale.

In [AS98I] è stata fornita una classificazione delle applicazioni della visione tridimensionale ai processi di produzione e indicata una rassegna delle principali tecniche utilizzate. Questa analisi critica di circa 50 articoli, unitamente alla bibliografia citata nelle altre pubblicazioni prodotte presso il DIMNP, fornisce un'ampia panoramica dello stato dell'arte nel campo dei controlli

di visione artificiale. Il progetto è stato condotto in collaborazione con le Unità di Ricerca (UR) della Università di Cassino (coordinatore del progetto), dell'Università di L'Aquila e del Politecnico di Milano.

1.1 COMPETENZE GIÀ SVILUPPATE PRESSO L'UNITÀ DI RICERCA (UR)

Il Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Nucleare e della Produzione (DIMNP) vanta una prolungata e diversificata esperienza nelle applicazioni dei sistemi di visione artificiale in campo industriale, realizzate presso il proprio laboratorio di Visione Industriale. Una rassegna di tali realizzazioni è stata presentata nella forma di Technical Report al Scientific and Technical Committee Assembly (STC "A") del Cirp [Cirp01SV].

1.1.1 CONTROLLO DI PRODOTTO TRAMITE VISIONE ARTIFICIALE

Presso il DIMNP è stato svolto uno studio, che si potrebbe definire pionieristico, che ha portato alla realizzazione del prototipo di un sistema di visione per la classificazione di piastrelle di marmo compiuta sia con un approccio di tipo statistico, sia facendo uso di reti neurali [5], [Carrara95]. Tale studio è stato poi esteso ad altri materiali lapidei come il granito [Carrara00] e all'analisi dei difetti [4], [Carrara97]. Nel campo dei controlli su parti meccaniche, presso il DIMNP, sono state curate diverse applicazioni in tutti i casi sviluppando algoritmi originali, quali:

1. presenza/assenza o scambi di componenti di serrature per automobili;
2. misure di pezzi stampati [Amst99VS];
3. controllo di integrità e eventuale presenza di difetti dovuti al processo produttivo su o-ring [Mrq98];

which is one of the most popular applications in both mechanical and electronic field. Currently the frontier in vision system applications research is represented by:

- study of integrated systems, to reduce hardware complexity incorporating more and more functions embedded into the sensors;
- miniaturization, to increase versatility of applications in case of limited space requirements;
- three-dimensional (3D) vision, most industrial applications are 2D type and neither consolidated algorithms nor commercial products exist to solve the problem definitely;
- application to non-traditional machining operations.

In research, as in industrial field, the power available today allows the implementation of more complex algorithms that can manage the variability and unpredictability of natural products.

In this latter area has been conducted the research involving the University of Pisa. The open problems mainly concern the definition of objective parameters that can be correlated with the results of stone material surface processing, and the development of methods for their experimental determination.

In [AS98I] a classification of 3D vision applications for production processes is shown as well as a review of the main techniques used. This critical analysis of about 50 papers, together with the literature cited in other publications produced at the DIMNP, provides a broad overview of the state of the art in artificial vision.

The joint project was conducted by the Research Units

(RUs) of University of Cassino (project coordinator), University of L'Aquila and Politecnico di Milano.

1.1 SKILLS ALREADY DEVELOPED AT THE RESEARCH UNIT (RU)

The Department of Mechanical, Nuclear and Production Engineering (DIMNP) boasts a long and varied experience in applications of artificial vision systems in industrial field, thanks to its laboratory of Industrial Vision.

A review of these achievements was presented in the form of technical report to the Scientific and Technical Committee Assembly (STC "A") of the CIRP [Cirp01SV].

1.1.1 PRODUCT INSPECTION BY ARTIFICIAL VISION

A pioneer study was conducted at DIMNP and it led to the creation of a prototype vision system for the classification of marble tiles accomplished by both statistical approach and use of neural networks [5], [Carrara95].

This study was then extended to other stone materials such as Granite [Carrara00] and to the analysis of defects [4], [Carrara97]. In the field of inspections of mechanical parts different applications were made, in all cases developing original algorithms, such as:

1. presence/absence or change of lock components for automobiles;
2. measures of moulded parts [Amst99VS];
3. integrity check and eventual presence of defects due to o-rings production process [Mrq98];
4. ball bearings [Prime01VS] with a vision system, in co-operation with Magna, Siemens and SKF;



4. cuscinetti a sfera [Prime01VS] con un sistema di visione, rispettivamente in collaborazione con Magna, Siemens e SKF.

5. controllo di qualità sulla pelle per la rifilatura, sull'argomento sono stati attivati due progetti finanziati dalla Fondazione Cassa di Risparmio di Pisa [Atti08] e dalla UE programma Cornet.

1.1.2 CONTROLLO DEI PROCESSI DI LAVORAZIONE TRAMITE VISIONE ARTIFICIALE

Le tecniche di visione artificiale sono state applicate anche ad una pluralità di processi come ausilio per l'automazione e il controllo, di cui vengono elencate le più significative.

- Per le operazioni robotizzate assistite tramite visione artificiale in campo tridimensionale è necessaria l'implementazione di sofisticati modelli per la descrizione della configurazione geometrica e del comportamento dei diversi componenti del sistema di visione (telecamera/e, lenti, ecc.). In [AS98II] sono stati proposti due metodi per la localizzazione basati su approcci radicalmente diversi: il primo con reti neurali e singola telecamera, il secondo, sviluppato in collaborazione con l'Università di Stanford, per risolvere il problema delle corrispondenze tra immagini stereo.

- È stato sviluppato e applicato un metodo di calibrazione e localizzazione tridimensionale stereo basato su reti neurali [AS96] e la relativa estensione al caso di tre telecamere [Elot96]. Tale sistema opera in tempo reale ed è in grado di ricostruire la posizione nello spazio dell'oggetto osservato.

- Con particolare riferimento al montaggio, è stato pro-

posto un sistema integrato tra un sensore di forza e di visione, per il problema peg-in-hole [Icme98].

- In [Amst96] è stato proposto un metodo per aumentare la precisione nel rilevamento della posizione di oggetti in 3D in moto lungo traiettorie note a priori.

- In [Adm97] viene descritto un metodo semplice per l'acquisizione di profili bidimensionali da prototipi in legno al fine di programmare il ciclo di lavorazione alle macchine utensili.

Nell'ambito del Progetto Nazionale biennale SPI, è stato realizzato presso il DIMNP un sistema di controllo on-line di saldature per una cella automatizzata [Aitem99]. Sono state curate, inoltre, numerose esperienze nel campo del controllo dello stato dell'utensile per lavorazioni meccaniche (TCM) [Ampt99] [Iwk96].

1.1.3 LAVORAZIONI DI MATERIALI LAPIDEI

Nel precedente Cofin 2001 l'UR di Pisa ha sviluppato un prototipo di macchina di prova per perline diamantate che ha permesso di realizzare in laboratorio test per la determinazione delle condizioni ottimali di taglio con filo diamantato [ROC03] [Aitem03] [Aitem].

2. DESCRIZIONE DELLA RICERCA ESEGUITA E DEI RISULTATI OTTENUTI

I principali temi affrontati nel corso della ricerca sono stati:

- analisi con metodi ottici di superfici lucidate;
- caratterizzazione delle superfici con diverse metodologie;
- incisione di codici su materiali lapidei.

2.1 ANALISI CON METODI OTTICI DI SUPERFICI LUCIDATE

Lo studio ha riguardato l'applicazione di metodi ottici,

5. quality control of skin for trimming; two projects funded by Fondazione Cassa di Risparmio di Pisa [Atti08] and EU Cornet program.

1.1.2 CONTROL OF MANUFACTURING PROCESSES BY ARTIFICIAL VISION

The artificial vision techniques have also been applied to a plurality of processes to assist in automation and control and the most significant are listed hereunder:

- For robotic operation assisted by artificial vision in 3D field it is needed to implement sophisticated models for describing the geometric configuration and behaviour of different components of the vision system (camera/s, lenses, etc.). In [AS98II] two methods have been proposed for localization, based on radically different approaches: the first with neural networks and single camera, the second, developed in collaboration with the University of Stanford, to solve the problem of matching stereo images.

- A stereo 3D method of calibration and localization has been developed and applied based on neural networks [AS96] and its extension to the case of three cameras [Elot96]. This system operates in real time and it is able to reconstruct the position in the space of the observed object.

- With particular reference to assembly, an integrated system between a force sensor and a vision sensor for the peg-in-hole problem was proposed [Icme98].

- In [Amst96] a method was proposed to increase accuracy in detecting the position of objects in 3D motion along paths known before.

- In [Adm97] a simple method was described for the acquisition of 2D profiles from wooden prototypes to plan the machining cycle. Under the biennial National Project SPI, a welding on-line control system for an automated cell was carried out at DIMNP [Aitem99]. Many experiences were also treated in monitoring of machining tool (TCM) [Ampt99] [Iwk96].

1.1.3 STONE MATERIAL MACHINING

In the previous COFIN 2001, the Pisa RU has developed a prototype test machine for diamond beads that allowed to perform laboratory tests for determining the optimum diamond wire cutting conditions [ROC03] [Aitem03] [Aitem].

2. DESCRIPTION OF THE RESEARCH AND RESULTS

The main issues addressed during the research were:

- analysis of polished surfaces with optical methods
- characterization of surfaces with different methods
- code engraving on stone materials.

2.1 ANALYSIS OF POLISHED SURFACES WITH OPTICAL METHODS

The study focused on the application of optical methods, based on the analysis of the reflected rays on a surface at different stages of processing and on the correlation between these data and surface characteristics (mainly roughness) of samples of stone material at different stages of processing. The main aesthetic feature of a polished stone product is the shine. The study showed a theoretical and experimental link between the reflectance

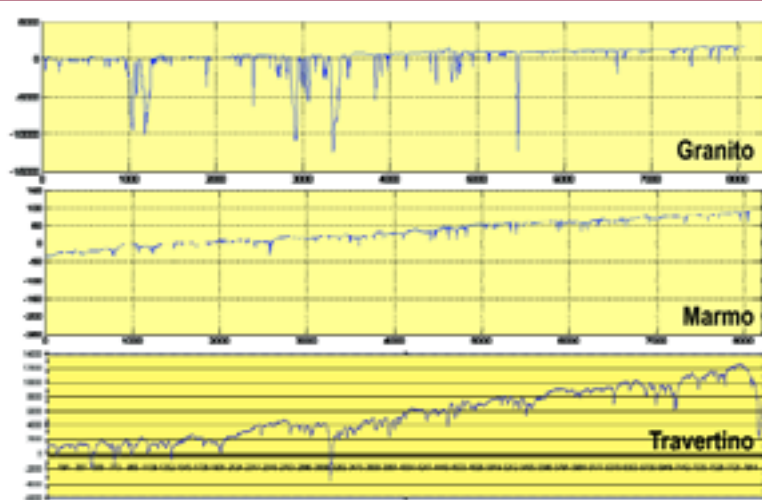




basati sull'analisi dei raggi riflessi su una superficie a vari livelli di lavorazione e sulla correlazione fra tali dati e le caratteristiche superficiali (essenzialmente la rugosità) di campioni di materiale lapideo a diversi gradi di lavorazione. La principale caratteristica estetica di un manufatto in materiale lapideo lucidato è la lucentezza. Lo studio ha dimostrato un legame teorico e sperimentale tra la riflettanza (parametro quantitativo direttamente legato alla frazione di luce riflessa in direzione speculare) e la finitura superficiale ottenuta con una data lavorazione di lucidatura. I campioni sono stati

soprattutto forniti dall'Unità di Cassino, ma l'indagine è stata applicata anche a vari tipi di materiali reperiti sul mercato. Per quanto riguarda la dipendenza dalla rugosità del rapporto tra luce riflessa e luce incidente, l'analisi bibliografica ha evidenziato due relazioni teoriche:

1. la prima valida per R_q molto minore della lunghezza d'onda della luce incidente;
2. la seconda, derivante dagli studi sul rendering delle superfici generate al computer, mostra l'intensità della luce in una direzione in funzione della giacitura del piano, dell'angolo di incidenza e della rugosità prevista per una data direzione.



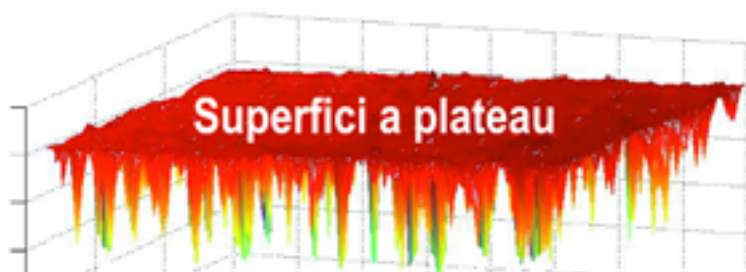
Profili di rugosità (non filtrati) per diversi tipi di lapidei
Unfiltered roughness profiles for different stone types

2.1.1 IL RIFLETTOMETRO

Per la verifica delle relazioni ed in generale per gli studi sperimentali sulla riflettometria, è stata messa a punto un'apparecchiatura per l'esecuzione di analisi riflettometriche su campioni di piastrelle in materiale lapideo a diversi gradi di finitura superficiale ($R_k < 4$ micron). Tale dispositivo, realizzato in diverse configurazioni, è uno dei principali risultati del progetto.

2.1.1.1 PRIMO PROTOTIPO: RIFLETTOMETRO BASATO SU SORGENTE DI ILLUMINAZIONE VISIBILE

Gli strumenti adoperati nella ricerca sperimentale, posizionati all'interno di una cella di acquisizione, appositamente realizzata per l'ottenimento di un ambiente d'analisi isolato e controllato, è composta



Esempio di superficie lapidea digitalizzata relativa ai campioni precedenti.
Si denotano chiaramente i picchi negativi tipici di una superficie a plateau
Example of stone digital surface for the samples above. Negative peaks are clearly visible, showing a plateau-like behaviour

(quantitative parameter directly related to the fraction of light reflected towards a mirror) and the surface finishing obtained by different polishing techniques.

Samples were mainly supplied by the Unit of Cassino, but the investigation has also been applied to various types of materials available on the market.

Regarding dependence of the relationship between reflected light and incident light from the roughness, the literature review has highlighted two theoretical relationships:

1. the first one is valid for a much smaller R_q than the wavelength of the incident light;
2. the second one, deriving from studies on the rendering of surfaces generated by the computer, shows the intensity of the light in a direction depending on the attitude of the plane, the incidence angle and the foreseen roughness for a given direction.

2.1.1 THE REFLECTOMETER

For the verification of relations and in general for the experimental studies on reflectometry, an equipment has been developed for performing reflectometry analysis on samples of stone material tiles at different stages of surface finish ($R_k < 4$ microns). This device, available in different configurations, is one of the major project results.

2.1.1.1 FIRST PROTOTYPE: A REFLECTOMETER BASED ON A VISIBLE LIGHT SOURCE

The instruments used in the experimental research, placed inside an acquisition cell specially designed for obtaining an isolated and controlled environment for analysis, consists of a coherent light source (He-Ne laser with a wavelength of 633 nm) of 6 mW and a receptor positioned to receive the reflected rays from the samples. The receptor is a high performance camcorder, with CCD sensor, monochrome (8 bits) connected to a computer through an A/D dedicated card. The camera used for this study has a standard CCIR with 768 x 576 pixel resolution and f/32 aperture and 80 mm focal length lenses. The light source was attenuated with a 97% filter. The instrumentation used for the reflectometry analysis was placed on a modular aluminium equipment specially designed for precise adjustment of the angles of the inspection ray and the matrix sensor. The axis of the incident laser beam is placed each time at a specified epsilon angle referred to the perpendicular



da una fonte di luce coerente (laser He-Ne con lunghezza d'onda di 633 nm) da 6 mW ed un recettore posizionato per ricevere i raggi riflessi dai campioni.

Il recettore è una videocamera ad alte prestazioni, con sensore CCD, monocromatica (8 bit) connessa ad un calcolatore per mezzo di una scheda A/D dedicata.

La videocamera utilizzata per questo studio ha uno standard CCIR con risoluzione 768x576 pixel e su di essa è montato un treno di lenti con diaframma f/32 e lunghezza focale di 80 mm. La fonte luminosa è stata attenuata con un filtro al 97%. La strumentazione adoperata per l'analisi riflettometrica è stata posizionata su una attrezzatura modulare in alluminio appositamente realizzata per la regolazione precisa degli angoli di posizionamento del raggio di ispezione e del sensore matriciale. L'asse del raggio laser incidente viene posizionato di volta in volta ad uno specificato angolo epsilon riferito alla perpendicolare alla superficie del campione. L'asse del recettore viene regolato di conseguenza in posizione speculare rispetto all'asse del raggio incidente. Con questa tecnica la quantità di luce riflessa delle immagini acquisite viene valutata a livello di pixel usando software ed hardware specifici per l'immagine processing.

2.1.1.2 SECONDO PROTOTIPO: RIFLETTOMETRO BASATO SU SORGENTI DI ILLUMINAZIONE INTERCAMPILI NIR

In base ad un'analisi spettrofotometrica (dettagliata di seguito) sono emersi i vantaggi connessi con l'impiego di sorgenti ad elevata lunghezza d'onda per la caratterizzazione di materiali lapidei. In particolare, sono stati impiegati 4 diodi Laser Ø 5.6 mm con lunghezze d'onda nel vicino infrarosso (NIR) pari a: 785-980-1310-1550 nm e come sensore un Optical Beam Analyzing System

operante nel range: 700-1800 nm. Questa configurazione, di maggiore costo, oltre alla maggiore versatilità, consente di estendere il campo di indagine anche a campioni aventi valori di rugosità più elevati.

Ad esempio, tale dispositivo, se inserito in una macchina di lucidatura multiteste, consente un controllo anche in fasi intermedie del processo.

2.1.1.3 TERZO PROTOTIPO: RIFLETTOMETRO INGEGNERIZZATO

In collaborazione con l'Unità di Cassino è stata realizzata una versione compatta del secondo tipo di riflettometro con singola sorgente di illuminazione NIR ottimizzata in base ai risultati delle prove svolte con il secondo prototipo. Sono state, inoltre, sviluppate diverse configurazioni per l'esecuzione in automatico di misure ripetute su campioni, tramite una movimentazione controllata del dispositivo e/o del manufatto da esaminare. Il sistema, a 3 assi controllati, prevede diverse configurazioni (con riflettometro mobile e manufatto fisso e viceversa) e consente di impostare la strategia per l'acquisizione automatica in punti uniformemente distribuiti sulla superficie da controllare.

2.1.1.4 PROVE SPERIMENTALI

Sono stati analizzati:

- piastrelle in Breccia Sarda Chiara a dodici stadi di lavorazione (gli ultimi tre di lucidatura, gli altri di finitura e sgrossatura);
- tre diversi tipi di Coreni (Nocciolato, Perlato e Mezza Perla) a tre stadi di lavorazione (forniti dall'Unità di Ricerca dell'Università di Cassino);
- quattro diversi tipi di Marmi all'ultimo stadio di lucidatura;
- tre diversi tipi di Graniti all'ultimo stadio di lucidatura;

to the sample surface. The receptor axis is adjusted accordingly in a mirror position on respect to the axis of the incident ray. With this technique the amount of the light reflected by the acquired images is evaluated at the pixel level using image processing specific software and hardware.

2.1.1.2 SECOND PROTOTYPE: A REFLECTOMETER BASED ON NIR INTERCHANGEABLE LIGHT SOURCES

According to spectrophotometric analysis (detailed below) the advantages have been showed associated with the use of sources with high length wavelength for the characterization of stone materials. In particular four 5.6 mm Ø laser diodes have been used with wavelengths in the near infrared (NIR) equal to: 785-980-1310-1550 nm and an Optical Beam Analyzing System as a sensor operating in the range of 700-1800 nm.

This higher cost configuration, in addition to a greater flexibility, extends the research field for samples with higher roughness values. For example, this device, when inserted in a multi-head polishing machine, allows any check in intermediate stages of the process.

2.1.1.3 THIRD PROTOTYPE: AN ENGINEERED REFLECTOMETER

In collaboration with the Unit of Cassino a compact version of the second type of reflectometer was made with a single optimized NIR illumination source based on the results of the tests executed with the second prototype. Different configurations have also been developed to run repeated measurements on samples automatically,

using a controlled handling of the device and/or of the artefact to be examined. The system, with 3 controlled axes, provides various configurations (with mobile reflectometer and fixed artefact, and vice versa) and allows to set the strategy for the automatic acquisition at uniformly distributed points on the surface to check.

2.1.1.4 EXPERIMENTAL TESTS

The following samples were analyzed:

- Breccia Sarda Chiara tiles at twelve stages of processing (last three of polishing, other of finishing and roughing);
 - three different types of Coreno (Nocciolato, Pearl and Half Pearl) at three processing stages (supplied by the Research Unit of the University of Cassino);
 - four different types of marble at the last stage of polishing;
 - three different types of granite at the end polishing stage;
 - a sample of Travertine at the last stage of polishing.
- The acquisitions were made using angles of incidence ranging from 10° to 80° at intervals of 10°, and even at 85°. For each incidence angle and for each sample the captured images were seven: the first was used for checking the focusing of the space frame and the dimensioning of the detection field; the second was the beam image reflected by a high precision mirror (99.7% of reflection) on the sensor for the calibration of the system (image is taken as a reference for comparison with the remaining five ones), the latest five ones represented the images of the reflected beam, at five different points, from the sample to the sensor.

Two test campaigns were performed:





- un campione di Travertino all'ultimo stadio di lucidatura. Le acquisizioni sono state effettuate utilizzando angoli di incidenza variabili da 10° a 80° , ad intervalli di 10° , ed anche a 85° . Per ogni angolo di incidenza e per ogni campione le immagini catturate sono state sette: la prima è impiegata per la verifica della messa a fuoco dello spazio da inquadrare e il dimensionamento del campo di rilevamento; la seconda rappresenta l'immagine del fascio riflesso da uno specchio ad alta precisione (99,7% di riflessione) sul sensore per la taratura del sistema (immagine che viene presa come riferimento per il confronto con le rimanenti cinque); le ultime cinque rappresentano le immagini del fascio riflesso, in cinque punti diversi, dal campione al sensore.

Sono state eseguite due campagne di prova:

1. nel primo caso è stato mantenuto un angolo di incidenza fisso e sono state eseguite rilevazioni su campioni dello stesso materiale, ma con finitura superficiale differente;
2. nel secondo caso le rilevazioni sono state eseguite mantenendo lo stesso campione, ma variando l'angolo di incidenza del laser.

2.1.1.5 RISULTATI OTTENUTI CON L'USO DEI RIFLETTOMETRI

Il confronto della caratteristica dell'intensità di luce riflessa, ottenuta con il primo prototipo di riflettometro, con la curva estrapolata dalle caratteristiche della prima equazione teorica, trova una buona cor-

1. in the first case a fixed angle of incidence was kept and measurements were performed on samples of the same material, but with different surface finishing;

2. in the second case the measurements were performed keeping the same sample but varying the incidence angle of the laser.

2.1.1.5 RESULTS OBTAINED USING THE REFLECTOMETERS

The comparison of the characteristic of the reflected light intensity, obtained with the first prototype reflectometer, with the curve extrapolated from the characteristics of the first theoretical equation, is a good correlation between the experimental tests and the theoretical aspects of the optical phenomena. It must keep in mind that this equation is valid only for values of R_q roughness lower at least an order of magnitude compared to the wavelength the incident ray. Since, in most cases, the surface roughness of stone materials in various stages of polishing exceeds the value of 0.1 microns, the theoretical analysis can be used only in particular cases as for the super-polishing of marbles (e.g. Carrara marble slabs for covering $R_a = 0.01$ and $R_q = 0.052$). The survey has identified the optimal incidence angle for each condition for which we have the maximum sensitivity. From the large trial, it emerged that:

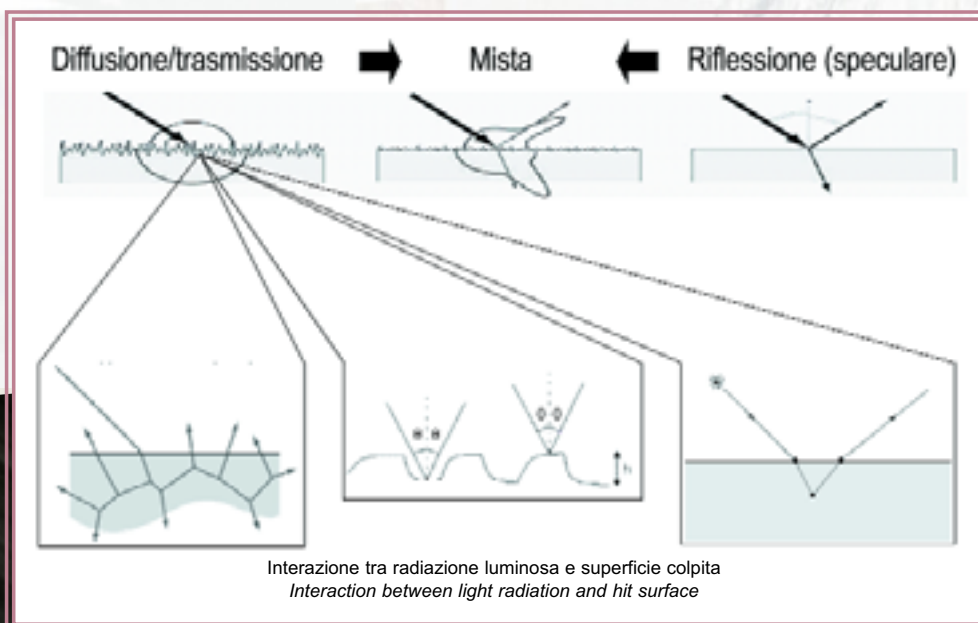
- you must use sources with high wavelength to extend the field of investigation to higher values of roughness;

relazione tra le prove sperimentali e gli aspetti teorici dei fenomeni ottici. Bisogna tenere presente che tale equazione è valida solo per valori di rugosità R_q inferiori almeno di un ordine di grandezza rispetto alla lunghezza d'onda del raggio incidente. Poiché, nella maggior parte dei casi, la rugosità delle superfici dei materiali lapidei a vari stadi di lucidatura supera il valore di 0.1 micron, l'analisi teorica può essere impiegata solo in casi particolari come per la super-lucidatura dei marmi (es. lastre di Marmo di Carrara per rivestimento $R_a=0.01$ e $R_q=0.052$). L'indagine ha permesso di identificare per ogni condizione l'angolo di incidenza ottimale per cui si ha la massima sensibilità.

Dall'ampia sperimentazione è scaturito che:

- è necessario utilizzare sorgenti ad elevata lunghezza d'onda per estendere il campo di indagine ad elevati valori di rugosità - per materiali traslucidi, come la maggior parte dei materiali lapidei, l'angolo di incidenza deve essere elevato ($>45^\circ$).

L'impiego del secondo prototipo di riflettometro ha per-



- for translucent materials, like most of the stone materials, the incidence angle must be high ($> 45^\circ$). The use of the second prototype of reflectometer has led to the following results:

- improving of the mechanical equipment to facilitate both the rapid placement of the angles of incidence and reflection and the proper reference between the reflectometer and the surface that requires high precision;
- the use of different sources in the near infrared range to improve the sensitivity of the equipment.

The parameter measured by the reflectometer is the reflectance, of which the theoretical expression from the literature is known as a function of: material properties (refractive index) and surface (surface finishing) and instrument configuration (angle of incidence of the light ray). The comparison between the measurements and the data related to the material (measured as indicated below) showed a good agreement with the theoretical model. The test campaign allowed to determine the configuration of the tool for maximizing the sensitivity of the instrument and extend the measurement range of roughness, characterized by the R_k parameter.

The results of this study have been patented with the support of the University of Pisa n° PI/2007/A/000105,



messo di conseguire i seguenti risultati:

- miglioramento dell'attrezzatura meccanica per facilitare sia il rapido posizionamento degli angoli di incidenza e di riflessione che il corretto riferimento tra il riflettometro e la superficie che richiede un'elevata precisione;
 - l'impiego di diverse sorgenti nel campo del vicino infrarosso per migliorare la sensibilità dell'apparecchiature.
- Il parametro misurato dal riflettometro è la riflettanza, di cui è nota l'espressione teorica dalla letteratura in funzione di:
- caratteristiche del materiale (indice di rifrazione) e della superficie (finitura superficiale);
 - configurazione dello strumento (angolo di incidenza del raggio luminoso).

Il confronto tra le misure effettuate e i dati relativi al materiale (rilevati come indicato di seguito) hanno mostrato un buon accordo con il modello teorico. La campagna di prove ha permesso di determinare la configurazione dello strumento che consente di massimizzare la sensibilità dello strumento e di estendere l'intervallo di misura della rugosità, caratterizzata tramite il parametro Rk. I risultati di questo studio sono stati oggetto di brevetto con il supporto dell'Università di Pisa, n° PI/2007/A/000105, data l'innovatività del dispositivo e l'interesse industriale.

2.1.2 CARATTERIZZAZIONE DI SUPERFICI A BASSA RUGOSITÀ ($R_a < 4$ MICRON)

2.1.2.1 CARATTERIZZAZIONE DELLE SUPERFICI CON METODI A CONTATTO

Tutti i campioni sono stati analizzati con il rugosimetro a contatto presente in laboratorio al fine di avere un riferimento oggettivo relativo alle misure con i metodi ottici. Sono state eseguite 20 acquisizioni per campione con

lunghezza d'onda di taglio di 0.08, prendendo in considerazione i parametri R_a , R_q , R_k , R_{vk} , R_{pk} , MR_1 e MR_2 . I parametri R_{vk} , R_{pk} , MR_1 e MR_2 non hanno dato risultati soddisfacenti. I parametri di rugosità R_a e R_q hanno dato risultati simili, ma poco sensibili a piccole variazioni di finitura superficiale. Il parametro R_k , che tiene conto della forma del profilo superficiale, rispecchia con maggiore fedeltà le caratteristiche riflettometriche analizzate precedentemente. Da un'analisi qualitativa delle superfici esaminate è emerso chiaramente che l'effetto delle lavorazioni di lucidatura sulla maggior parte dei materiali lapidei (ad eccezione del marmo) è quello di rimuovere le creste delle asperità superficiali lasciando inalterate le cavità presenti dovute alla microporosità. L'aspetto che ne deriva è quello tipico di una superficie a plateau le cui caratteristiche possono essere notoriamente meglio espresse attraverso il parametro R_k . Per il rilievo dei profili di rugosità, il rugosimetro è stato corredato con un sistema di movimentazione a 3 assi controllati, per l'acquisizione automatica di valori in diverse zone della superficie da analizzare e per la scansione di tratti di superficie tramite l'acquisizione di profili contigui.

2.1.2.2 ANALISI MEDIANTE GLOSSMETRO

I campioni dei lapidei sono stati analizzati anche con un glossmetro commerciale, ad angolo speculare di 20°, 60° e 85°, che restituisce valori di brillantezza espressi in GU secondo la normativa ASTM D 532-89. Questo tipo di strumento è quello maggiormente adoperato nell'industria lapidea per la misura della lucentezza dei prodotti in pietra lucidati. Dalle acquisizioni effettuate è risultato che i valori in uscita dal glossmetro mostrano una

due the innovativeness of the device and the industrial interest.

2.1.2 CHARACTERIZATION OF LOW SURFACE ROUGHNESS ($R_a < 4$ MICRON)

2.1.2.1 SURFACE CHARACTERIZATION BY CONTACT METHODS

All the samples were analyzed with the contact roughness instrument available at the laboratory in order to have a reference objective relevant to the measures with the optical methods. 20 acquisitions were performed per sample with a wavelength of cut of 0.08, taking into account the parameters R_a , R_q , R_k , R_{vk} , R_{pk} , MR_1 and MR_2 . The parameters R_{vk} , R_{pk} , MR_1 and MR_2 do not have given satisfactory results. The roughness parameters R_a and R_q gave similar results, but little sensitive to small changes in surface finishing. The parameter R_k , which takes into account the shape of the surface profile, reflects more faithfully the previously analyzed characteristics reflectometry. From a qualitative analysis of the examined surfaces it became clear that the effect of polishing operations on most stone materials (except marble) is to remove the ridges of the surface asperities leaving unchanged cavities due to microporosity. The aspect that results from them is the typical one of a plateau surface whose characteristics, as known, may be best expressed by the parameter R_k . For the measurement of the roughness profiles, the roughness measurement instrument was provided with a 3- controlled axis motion system by the automatic acquisition of values in different zones of the surface to be analyzed for the scanning of

parts of the surface by the acquisition of contiguous profiles.

2.1.2.2 ANALYSIS BY GLOSSMETER

The stone samples were analyzed with a commercial glossmeter, at a 20°, 60° and 85° mirror angle, which returns values of brilliance expressed in GU in accordance with the ASTM D 532-89 standard. This type of instrument is the most used one in stone industry for measuring the gloss of polished stone products. From the executed acquisitions it was found that the output values from the glossmeter show a very large dispersion, especially for the incident 20° angle. Moreover the instrument is not capable of performing analysis on products with surface roughness greater than 0.1 μm . The experimental analysis and the comparison with other techniques have shown serious limitations in the use of the instrument that from the other side was designed and constructed to measure the brightness of other types of surfaces (varnishes, metal surfaces, ceramics, etc.).

2.1.2.3 SPECTROPHOTOMETRIC ANALYSIS

An innovative use has been proposed of a high precision spectrophotometer that embraces a 0.1-2.5 μm light spectrum. The spectrophotometer allowed to objectively evaluate the amount of light reflected, absorbed and transmitted by the samples. The tests were performed with a probe for optical fiber solids with a 1000 K white light bulb lamp. The obtained results confirm and guarantee a correlation between the reflected or absorbed light and the surface condition of the samples.





amplissima dispersione, soprattutto per l'angolo incidente di 20°. Inoltre, lo strumento non è in grado di eseguire analisi su prodotti con rugosità superficiale superiore allo 0.1 micron. L'analisi sperimentale e il confronto con le altre tecniche hanno mostrato serie limitazioni nell'utilizzazione dello strumento che, del resto, è stato concepito e realizzato per misurare la lucentezza di altri tipi di superfici (vernici, superfici metalliche, ceramiche ecc.).

2.1.2.3 ANALISI SPETTROFOTOMETRICA

È stata proposta una utilizzazione innovativa di uno spettrofotometro ad alta precisione che abbraccia uno spettro di luce 0.1-2,5 micron. Lo spettrofotometro ha consentito di valutare oggettivamente la quantità di luce riflessa, assorbita e trasmessa dai campioni. Le prove sono state eseguite con una sonda per solidi a fibra ottica con lampada a bulbo da 1000°K a luce bianca. I risultati ottenuti confermano e garantiscono una correlazione tra luce riflessa o assorbita e lo stato superficiale dei campioni. Lo spettrofotometro rileva l'energia di Assorbanza/Riflettanza ed è in grado di dare informazioni sulla composizione chimica dei materiali in esame. Molto utile per analisi comparative sperimentali, tuttavia questo strumento non è adatto per controlli di processo on-line, ha tempi di elaborazioni

elevati, è poco pratico ed è molto costoso. Lo strumento ha comunque fornito utili indicazioni sulle lunghezze d'onde da impiegare per l'analisi riflettometrica.

2.1.3 CARATTERIZZAZIONE DI SUPERFICI AD ELEVATA RUGOSITÀ

2.1.3.1 CARATTERIZZAZIONE DI SUPERFICI LAVORATE CON GETTO D'ACQUA CON PROFILOMETRIA OTTICA

È stato realizzato un sistema per il rilievo di superfici senza contatto basato su profilometria ottica.

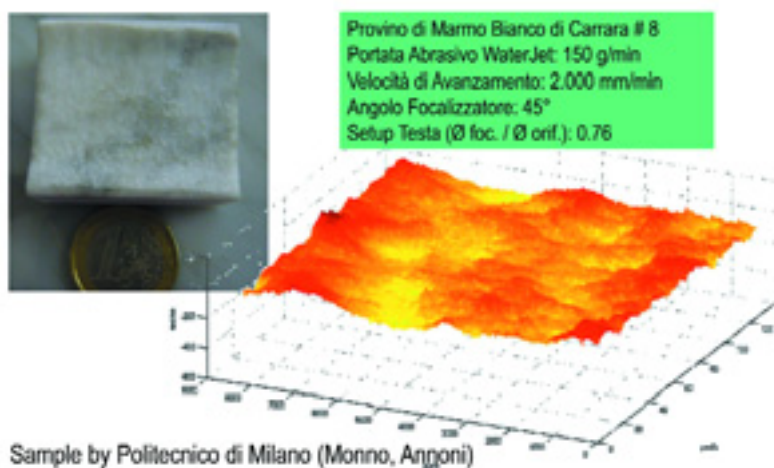
Il sistema comprende:

- un sensore commerciale di misura della distanza fra il sensore e la superficie ad elevata risoluzione (0,25 micron);
 - un sistema di movimentazione a 3 assi controllati da PC, realizzato con slitte motorizzate di elevata precisione.
- Il sistema è stato validato tramite rugosimetro e permette di acquisire profili e porzioni di superficie. Questo sistema è particolarmente adatto per l'analisi di superfici ad elevata rugosità ($R_a > 4$ micron) come quelle ottenute dall'Unità di Milano con lavorazione a getto d'acqua. L'analisi consente la valutazione degli effetti di diversi parametri del processo [ICDS08a].

2.1.3.2 RILIEVO DI ELEVATE PROTRUSIONI E CAVITÀ SUPERFICIALI CON SISTEMA DI VISIONE E ILLUMINAZIONE STRUTTURATA

È stata sviluppata una tecnica innovativa per determinare la presenza di protrusioni e cavità superficiali

basata su un particolare tipo di illuminazione strutturata ideata ad hoc. Allo scopo è stato realizzato un prototipo di un sistema portatile con telecamera e illuminatori in grado di rilevare la presenza di elementi di dimensione prestabilita



Ricostruzione computerizzata di superfici lavorate tramite idrogetto con abrasivo, acquisite tramite profilometro ottico / Computerized reconstruction of abrasive waterjet processed surfaces by optical profilometer

The system was validated by means of roughness measurement instrument and allows to capture profiles and portions of the surface. This system is particularly suitable for the analysis of high roughness ($R_a > 4 \mu m$) surfaces as those obtained by the Unit of Milan by water-jet machining. The analysis allows the evaluation of the effects of various process parameters [ICDS08a].

The spectrophotometer detects the absorption / reflectance energy and can provide information on the chemical composition of test materials. Very useful for experimental benchmarking test analysis, however this instrument is not suitable for on-line process controls, it has high processing time, it is impractical and very expensive. However the instrument has provided useful information on the wavelengths to be used for the reflectometry analysis.

2.1.3 CHARACTERIZATION OF HIGH ROUGHNESS SURFACES

2.1.3.1 CHARACTERIZATION OF WATER-JET MACHINED SURFACES BY OPTICAL PROFILOMETRY

A system was made to measure surfaces without contact based on optical profilometry. The system includes:

- a commercial sensor measuring the distance between the sensor and the surface at high resolution (0.25 μm);
- a 3-axis motion system controlled by a PC built with high precision motorized devices.

2.1.3.2 SURVEY OF HIGH PROTRUSIONS AND SURFACE CAVITIES BY VISION SYSTEM AND STRUCTURED LIGHTING

An innovative technique was developed to determine the presence of protrusions and surface cavities based on structured lighting system. For this a prototype was built of a portable system with camera and lights able to detect the presence of predetermined size elements and it has been tested to detect surface irregularities with a size between 0.3 and 0.5 mm on a 35x35 mm² squared area. Some students have also co-operated to this development within an educational project (see credits). The results of this developed particular technique are patentable with the scope to market compact and low cost devices for quality control.

2.1.3.3 THREE-DIMENSIONAL RECONSTRUCTION OF SURFACES BY STEREOSCOPIC VISION

As part of an apprenticeship in Mechanical Engineering has been developed an equipment for surface acquisi-



ed è stato testato per il rilevamento di irregolarità superficiali di dimensioni comprese tra 0,3 e 0,5 mm su un'area quadrata di 35x35 mm². Allo sviluppo hanno collaborato anche alcuni studenti nell'ambito di un progetto didattico (vedere ringraziamenti). I risultati sono suscettibili di brevettazione della particolare tecnica di rilievo sviluppata che mira alla commercializzazione di dispositivi compatti ed economici per il controllo di qualità.

2.1.3.3 RICOSTRUZIONE TRIDIMENSIONALE DELLE SUPERFICI CON VISIONE STEREOSCOPICA

Nell'ambito di un tirocinio in Ingegneria Meccanica è stata sviluppata un'attrezzatura per l'acquisizione di superfici e sviluppato il relativo software per la ricostruzione 3D. Il sistema è basato su algoritmo di visione stereoscopica. La coppia di immagini stereo viene ottenuta tramite traslazione del campione o della telecamera. Questo sistema è adatto per rilevare superfici molto scabre (con escursioni superiori al millimetro).

2.2 INCISIONE DI CODICI SU MATERIALI LAPIDEI

Quest'attività, prevista ai fini di sviluppare metodi per l'identificazione e la rintracciabilità dei manufatti in materiale lapideo, prevede il confronto delle tecnologie di incisione laser e con getto d'acqua ad alta pressione su provini di marmo di Carrara e perlato di Coreno.

2.2.1 INCISIONE LASER DI MARMO DI CARRARA

Nelle sedi di Cassino e di Pisa sono stati realizzati piani sperimentali rispettivamente

su Perlato di Coreno e marmo di Carrara per l'ottimizzazione dei seguenti parametri per incidere con adeguata definizione solchi su una superficie in materiale lapideo: potenza del laser, velocità di scansione, grado di umidità del materiale.

Per quanto riguarda le prove eseguite dall'Unità di Pisa, sono emerse le seguenti informazioni:

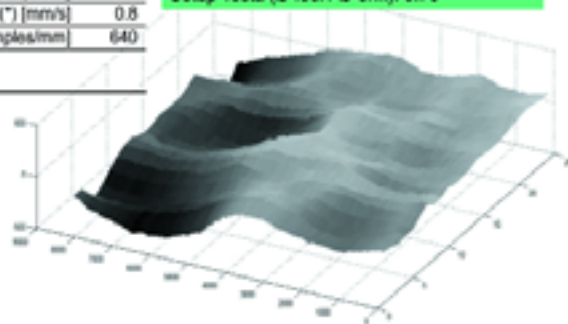
- con potenze minori di 3W: si ottiene la formazione di zone termicamente alterate, ma non si ha alcuna asportazione di materiale;
- con potenze comprese tra 4 e 10W: la quantità di materiale asportato cresce linearmente con il crescere della potenza e tale aumento è particolarmente vistoso;
- con potenze maggiori di 10W: la quantità di materiale asportato sembra essere praticamente costante all'aumentare della potenza applicata, anche se la curva risulta essere leggermente crescente.

Inoltre, è emerso che il materiale umido presenta una maggior asportazione di materiale probabilmente a causa delle particelle di acqua che, evaporando rapidamente, si espandono in maniera quasi esplosiva provocando la fratturazione del materiale. Questa sperimentazione, oltre a dimostrare la fattibilità del processo di incisione di codici (a barre o alfanumerici) tramite laser, permette di determinare i parametri necessari per ottenere un solco di dimensioni prestabilite.

Number of profiles	20
Spacing between profiles [mm]	0.5
Profile scan length [mm]	12.5
Cut wavelength λ_c [mm]	2.5
Evaluation length [mm]	3 x 2.5
Scan rate(*) [samples/s]	512
Translation speed(*) [mm/s]	0.8
Linear resolution(*) [samples/mm]	640

Provino di Perlato di Coreno # 59
Portata Abrasivo WaterJet: 150 g/min
Velocità di Avanzamento: 2.000 mm/min
Angolo Focalizzatore: 0°
Setup Testa (Ø foc. / Ø orif.): 0.76

(*) Optical profilometer



Strategia di acquisizione delle superfici lavorate tramite profilometro ottico
Parameters of the optical profilometer for the 3D surface acquisition

tion and its software for 3D reconstruction. The system is based on stereo vision algorithm. The pair of stereo images is obtained by translation of the sample or of the camera. This system is suitable to detect very rough surfaces (with excursions higher than one millimeter).

2.2 ENGRAVING CODES ON STONE MATERIALS

This activity, useful for identification and traceability of stone materials, makes a comparison between laser and high pressure water-jet engraving technologies using Carrara and Perlato di Coreno marble samples.

2.2.1 LASER ENGRAVING OF CARRARA MARBLE

At Cassino and Pisa laboratories experimental tests were carried out respectively on Perlato di Coreno and Carrara marble in order to optimize the main parameters to engrave a stone surface: laser power, scanning speed and moisture content of the material.

With regard to the tests conducted by the Unit of Pisa, the following information have been showed:

- with power less than 3 W: formation of heat-affected zones but no material removal;
- with power ranging from 4 to 10 W: the amount of material removed increases linearly with power and this increase is particularly striking;
- with power greater than 10 W: the amount of material removed seems to be almost constant increasing applied power, although the curve appears to be slightly increasing.

It was also showed that the wet material has a higher material removal probably due to the water particles that, evaporating rapidly, expand in an explosive manner causing the material fracturing. Besides proving the feasibility of code engraving process by laser (alphanumeric or bar code), this experiment can determine the parameters necessary to obtain a groove of fixed size.

2.2.2 IMPROVING THE READABILITY OF CHARACTERS ENGRAVED BY LASER ON CARRARA MARBLE

While laser treatment on dark stone materials produces colour alterations such as to generate a high contrast between the tracks produced by laser and the untreated areas, allowing the engraving of high readable codes by the common bar code scanners, this is not the case of Carrara marble, where the traces show a poor contrast. To improve the readability has been developed a technique based on the application of pigments on the marble surface dispersed in a liquid resin which after





2.2.2 MIGLIORAMENTO DELLA LEGGIBILITÀ DI CARATTERI INCISI CON LASER SU MARMO DI CARRARA

Mentre su materiali lapidei scuri il trattamento laser produce alterazioni cromatiche tali da generare un elevato contrasto fra le tracce prodotte dal laser e le zone non trattate, permettendo l'incisione di codici ad elevata leggibilità da parte dei comuni scanner per codici a barre, questo non si verifica nel caso del marmo di Carrara, in cui le tracce risultano scarsamente contrastate. Per migliorare la leggibilità è stata messa a punto una tecnica che prevede l'applicazione sulla superficie di marmo di pigmenti dispersi in una resina liquida che, una volta essiccata, ancora stabilmente il pigmento al materiale. Il successivo trattamento laser asporta il pigmento generando tracce altamente leggibili. La marcatura può essere effettuata sia in positivo che in negativo.

2.2.3 CARATTERIZZAZIONE DI CARATTERI INCISI

Le norme ISO relative alla stampa di caratteri indicano i requisiti per la leggibilità che rappresentano anche le specifiche per i processi di incisione. Per la caratterizzazione dei solchi realizzati dalle Unità di Milano, Cassino e Pisa è stato sviluppato da quest'ultima un sistema basato su visione artificiale e illuminazione strutturata. I metodi testati per la proiezione di pattern sui provini sono:

- l'uso di un videoproiettore, che ha presentato una buona flessibilità nella generazione delle griglie, ma presentava una risoluzione di un ordine di grandezza superiore a quella richiesta;
- un laser HeNe con lente cilindrica per la realizzazione di una lama di luce, che ha mostrato analoghe caratteristiche di risoluzione;

ristiche di risoluzione;

- il laser di cui sopra con l'aggiunta di un reticolo di diffrazione, che ha permesso di ottenere griglie con passo inferiore a 0,1 mm.

Le immagini sono state acquisite ad altissima risoluzione (1 micron/pixel). Tale tecnica consente di evidenziare la curva deformata che è stata interpolata ed analizzata tramite l'estrazione di parametri geometrici.

Le tre tecniche citate possono essere applicate per la ricostruzione di superfici ad elevata rugosità.

2.2.4 VALUTAZIONE TECNICHE DI INCISIONE LASER E GETTO D'ACQUA

L'analisi comparativa ha mostrato una maggiore penetrazione del getto d'acqua. Le tracce ottenute con laser hanno mostrato contorni più regolari e definiti [ICDS08b].

2.2.5 CONTROLLO DI QUALITÀ DI CARATTERI INCISI

È stato realizzato un sistema di acquisizione di immagini con illuminazione radente, in grado di eseguire il controllo di qualità e l'OCR sui manufatti incisi con i diversi processi su superfici lucidate, insensibile alla variabilità dei materiali. Tale sistema sarà facilmente applicabile industrialmente una volta che il processo di incisione di caratteri si sarà affermato, sia a scopo decorativo sia per la rintracciabilità dei prodotti.

3. TRASFERIMENTO DEI RISULTATI IN AMBITO INDUSTRIALE

3.1 SISTEMA DI ACQUISIZIONE DI LASTRE LUCIDATE

L'azienda Eurogranit che svolge l'attività di lucidatura nel comprensorio di Massa e Carrara ha dato incarico al

being dried firmly fix the pigment on the material. The following laser treatment removes the pigment generating highly readable patterns. Both positive and negative marking can be executed.

2.2.3 CHARACTERIZATION OF ENGRAVED CHARACTERS

The ISO standards for characters printing indicate the requirements for legibility that also represent specifications for the engraving processes. For the characterization of the grooves made by the Unit of Milan, Cassino and Pisa, a system was developed based on artificial vision and structured lighting. The proven methods for projecting patterns on the specimens are:

- the use of a video-projector, which provided a good flexibility in grid generation, but showed a resolution of an order of magnitude higher than that required;
 - a HeNe laser with a cylindrical lens to create a blade of light, which showed similar resolution characteristics;
 - the above laser by adding a diffraction grating, which allowed to obtain grids with a pitch less than 0.1 mm.
- The images were acquired at a very high resolution (1 μm / pixel). This technique allows to highlight the deformed curve that has been interpolated and analyzed by the extraction of geometric parameters. The three mentioned techniques can be applied for the reconstruction of high roughness surfaces.

2.2.4 EVALUATION OF ENGRAVING LASER AND WATER-JET TECHNIQUES

The comparative analysis showed a higher penetration

of the water-jet. The traces obtained by laser showed more regular and defined contours [ICDS08b].

2.2.5 ENGRAVED CHARACTERS QUALITY CONTROL

An image acquisition system was made with oblique lighting, capable of performing quality control and OCR on artefacts engraved by the various processes on polished surfaces, unaffected by material variability. This system will be easily industrially adopted when character engraving process will penetrate the market, both for decoration and for product traceability.

3. TRANSFERRING RESULTS TO INDUSTRY

3.1 POLISHED SLABS ACQUISITION SYSTEM

Eurogranit, a company performing stone polishing activities in the area of Massa and Carrara, has instructed the Department to develop an on-line acquisition system of processed slabs (about 2x3 m²).

The introduction of optical devices, although at a limited sophistication level, is highly innovative for the industry and represents a potential for spread of technology (by imitation) for quality control by vision systems [MMC06].

4. PRODUCTS DEVELOPMENT

During the project several prototypes were made with components already available from the Department and/or purchased with research funds.

The prototypes had a dual function:

- they were used for the acquisition of parameters for



Dipartimento per lo sviluppo di un sistema di acquisizione on-line di lastre lavorate (ca 2x3 m²).

L'introduzione di dispositivi di tipo ottico, anche se a livello di sofisticazione limitato, è altamente innovativo per il settore e rappresenta una potenzialità di diffusione della tecnologia (per imitazione) per il controllo di qualità con sistemi di visione [MMC06].

4. PRODOTTI DELLA RICERCA ESEGUITA

Nel corso del progetto sono stati realizzati numerosi prototipi con componenti già disponibili presso il Dipartimento e/o acquistati con i fondi della ricerca.

I prototipi realizzati hanno avuto una duplice funzione:

- sono stati impiegati per l'acquisizione dei parametri necessari alla valutazione dei processi messi a punto dai partner del progetto;
- come dimostratori per un auspicabile trasferimento in ambito industriale, allo scopo di controllare i processi relativi.

La descrizione dei vari prototipi, che hanno rappresentato la parte predominante degli sforzi di ricerca, è già inquadrata al paragrafo 2.

Di seguito vengono elencati i prototipi realizzati con le principali caratteristiche e scopi. Il prototipo di riflettometro, realizzato in tre versioni, è uno strumento innovativo. La versione basata su sistema di visione artificiale presenta potenzialità di impiego in ambito industriale, data la semplicità del principio sfruttato per il progetto. La versione NIR è essenzialmente da laboratorio ed è utilizzabile per analisi future su materiali anche diversi dai lapidei. La versione ingegnerizzata è finalizzata all'impiego industriale ed è scaturita direttamente dal

test del prototipo precedente su diversi campioni. Il riflettometro è stato, inoltre, interfacciato con un sistema di movimentazione configurabile e a controllo numerico. Per l'analisi delle superfici in materiale lapideo, lucidate e trattate tramite laser e getto d'acqua, sono state messe a punto due stazioni automatizzate di acquisizione basata su componenti commerciali che non presentano particolari caratteristiche di innovazione, ma che sono state necessarie per avere un riscontro oggettivo tra la strumentazione innovativa realizzata e metodologie di analisi consolidate. I due dispositivi sono basati rispettivamente su:

rugosimetro a contatto e profilometro ottico.

Sono stati inoltre realizzati due sistemi di visione per il rilievo di superfici con diversi range di rugosità, basati rispettivamente su:

- visione monoculare con illuminazione a diverse sorgenti cromatiche per il rilievo di asperità di dimensione prestabilita;
- visione stereoscopica per la mappatura di superfici tramite matching.

Per il rilievo di incisioni sono state realizzate diverse configurazioni di sistemi di visione con illuminazione strutturata basati su videoproiettore, lama di luce laser e reticolo di diffrazione. Con quest'ultimo è stata svolta l'analisi completa dei provini realizzati dai partner.

È stato realizzato il prototipo di un sistema di acquisizione di immagini di lastre lucidate e la relativa archiviazione. Tale sistema è stato installato su linea di produzione presso un'azienda che ha cofinanziato lo sviluppo.

È stato anche sviluppato un software per la realizzazione di mosaici (pre-posa virtuale) con le immagini dei

evaluation of processes developed by the project partners and

- as demonstrators for a desirable transfer into industry, for controlling the related processes.

The description of the various prototypes, which were the main core of the research efforts, was already framed in paragraph 2. Hereunder are the prototypes with the main characteristics and uses.

The prototype reflectometer, available in three versions, is an innovative tool. The version, based on artificial vision system, has a potential use in industry, due to the simplicity of the principle exploited for the project.

The NIR version is essentially a laboratory version and it can be used for future analysis on materials other than stone also. The engineered version is designed for industrial use and has directly resulted from testing the previous prototype on several samples.

The reflectometer has been also interfaced with a handling configurable and numerical control system. For the analysis of polished and treated stone surfaces by laser and water-jet, two automated acquisition stations, based on standard commercial components, were developed but it was necessary to get a comparison between the new innovative instrumentation and the established methods of analysis.

The two devices are based respectively on:

- contact roughness instrument
- optical profilometer.

There have also been realized two vision systems

for the detection of surfaces with different ranges of roughness based respectively on:

- monocular vision with different chromatic source lighting for the measurement of fixed size asperities;
 - stereoscopic vision for surfaces mapping by matching.
- Different configurations vision systems with structured lighting based on video projector, laser light blade and diffraction grating were made for the measurement of engravings. With the latter was carried out a complete analysis of the specimens made by the partners.

A prototype image acquisition system was made for polished slabs and related archiving. This system was installed on the production line at a company that has supported the project.

A software for the creation of mosaics (virtual pre-laying) with images of real objects was also developed.

An experimental innovative equipment was developed to evaluate abrasiveness of stone materials based on a rotating platform that supports the specimen and with a tip subjected to a controlled force, whose wear is evaluated by means of data acquisition.

5. ACKNOWLEDGMENTS

Eng. Santo Gentile of GDTech s.n.c. has collaborated to the project for the development of the reflectometer. We thank Diessechem s.r.l., Milan for assistance and equipment used in spectrophotometric measurements. The measuring system of the roughness was developed by students Matteo Tanzini, Alessandro Serio, Simone



manufatti reali. È stata messa a punto un'attrezzatura sperimentale innovativa per valutare l'abrasività di materiali lapidei basata su piattaforma rotante che supporta il provino e con un puntale sottoposto a forza controllata di cui viene valutata l'usura tramite acquisizione dati.

5. RINGRAZIAMENTI

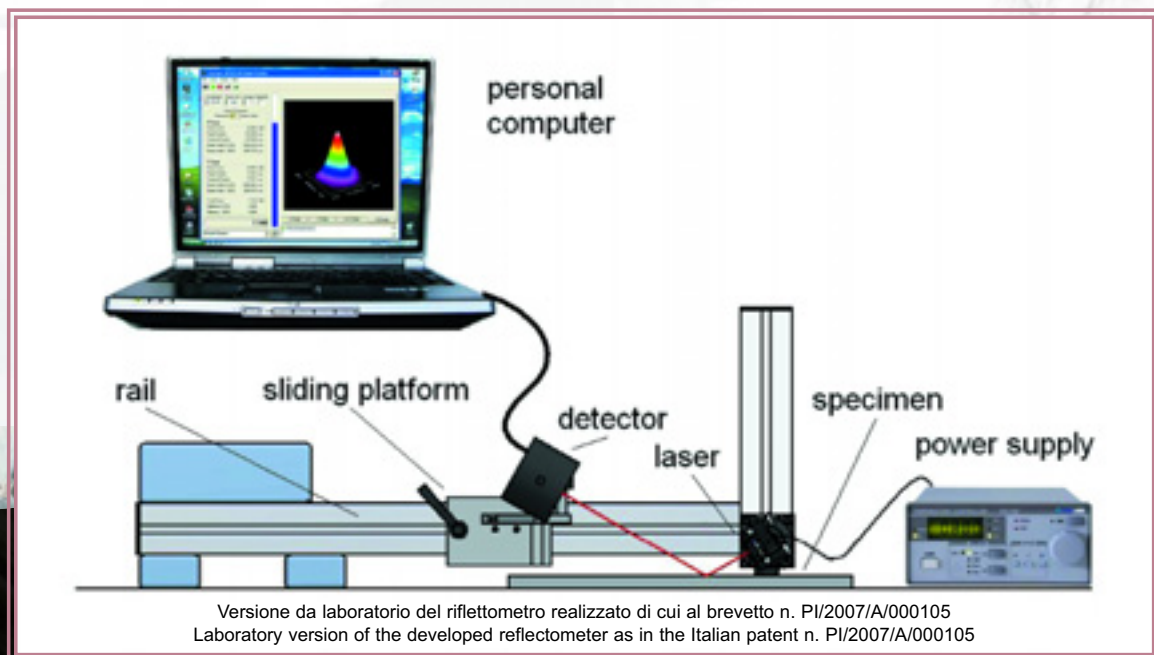
Al progetto ha collaborato l'Ing. Santo Gentile della società GDTech s.n.c. per lo sviluppo del riflettometro. Si ringrazia la società Diessechem s.r.l. di Milano per l'assistenza e le attrezzature impiegate nelle misure spettrofotometriche.

Il sistema di rilievo delle asperità è stato sviluppato dagli studenti Matteo Tanzini, Alessandro Serio, Simone Natali, Massimo Satler e Giuseppe Angotzi nell'ambito del progetto didattico di Automazione dei Processi Produttivi del Corso di Laurea Specialistica in

Ingegneria della Automazione, a.a. 2005-06.

Il sistema di visione per la ricostruzione stereo di superfici scabre è stato sviluppato dallo studente Daniele Ciomei nell'ambito del tirocinio del Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica. Si ringraziano inoltre:

- Ing. Marco Clemente, Ing. Camillo Scionti e Ing. Giacinto Lombardi (tesi di laurea in Ingegneria Meccanica del vecchio ordinamento);
- Sig.ra Federica Fanti (acquisizione di superfici scabre tramite illuminazione strutturata), Ing. Guido Lenzi, Ing. Alessandro Bernardelli (caratterizzazione di superfici scabre ottenute tramite lavorazione a getto d'acqua), Ing. Alessandro Maggesi (ingegnerizzazione del riflettometro), Ing. Valerio Zambardi (sviluppo di un sistema integrato a contatto e ottico per l'analisi di superfici) - tirocini Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica.



Natali, Massimo Satler and Giuseppe Angotzi in the educational project 'Production Process Automation' during the Master degree in Automation Engineering, year 2005-06. The vision system for the stereo reconstruction of rough surfaces was developed by the student Daniele Ciomei within the apprenticeship for the degree in Mechanical Engineering.

We also thank:

- Eng. Marco Clemente, Eng. Camillo Scionti and Eng. Giacinto Lombardi (thesis degree in Mechanical Engineering, old course system).
- Ms. Federica Fanti (acquisition of rough surfaces by means of structured lighting), Eng. Guido Lenzi, Eng. Alessandro Bernardelli (characterization of rough surfaces obtained by water-jet machining), Eng. Alessandro Maggesi (engineering of the reflectometer), Eng. Valerio Zambardi (development of an integrated contact and optical system for surface analysis) - training period of the course of degree in Mechanical Engineering.

6. LITERATURE / RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

[AS98] Lanzetta, M.: Visione Tridimensionale nei Processi di Produzione - "Stato dell'Arte", Automazione e Strumentazione Elettronica Industriale, ANIPLA, Associazione Nazionale Italiana per l'Automazione, n°2, Anno XLVI, Febbraio 1998, pag. 155-164.

[Cirp01SV] Lanzetta, M.: Industrial applications of artificial vision in automated assembly, Technical Report presentato personalmente al Scientific and Technical Committee Assembly (STC "A"), 51st CIRP General Assembly, Nancy, Francia, 19-25 Agosto, 2001.

[Carrara95] Tantussi, G.; Lanzetta, M.: Nuove Applicazioni dell'Analisi di Immagini nel Settore dei Lapidari, Tecnolapidei '95, Convegno su "La coltivazione in sotterraneo e la tutela ambientale", Carrara '95, XXVI Fiera Internazionale Marmi Macchine e Servizi, Carrara, 20 Maggio 1995.

[Carrara00] Lanzetta, M.; Tantussi, G.: Sviluppo e Confronto di Tecniche di Controllo di Qualità di Manufatti in Granito, Articolo su invito, Atti del Convegno "Studi e indagini sui materiali lapidei", Carrara 2000, XXI Fiera Internazionale Marmi, Macchine e Servizi, Ed. Tipografia Editrice Pisana, Carrara, 3 Giugno, 2000, pag. 21-30.

[Carrara97] Tantussi, G.; Lanzetta, M.: Applicazioni dei Sistemi di Visione per il Riconoscimento di Difetti nel Settore Lapidario, Convegno su "La didattica e la ricerca per un nuovo



sviluppo della risorsa marmo. Sicurezza, ambiente, produttività", Carrara '97, XVIII Fiera Internazionale Marmi, Macchine e Servizi, Carrara, 25 Maggio 1997.

[Amst99VS] Lanzetta, M.; Tantussi, G.: Vision System Calibration and Sub-Pixel Measurement of Mechanical Parts, AMST'99, Atti del 5° Congresso Internazionale su "Advanced Manufacturing Systems and Technology", CISM Courses and Lectures No. 406, Ed. E. Kuljanic, ISBN: 3-211-83148-7, Springer-Verlag, Wien New York, Udine, 3-4 Giugno, 1999, pag. 695-702.

[Mrq98] Lanzetta, M.: The Quality Control of Critical Assembly Components: Visual Inspection of O-Rings, 2nd MRQ, Atti del 2° Congresso Internazionale su "Planned Maintenance, Reliability and Quality", Ed. G.J. McNulty, ISBN: 0 86339 7867, Oxford, UK, 2-3 Aprile, 1998, pag.132-137.

[Prime01VS] Lanzetta, M.; Tantussi, G.; Santochi, M.: The Process Control in Manufacturing: Inspection of Ball Bearings, PRIME 2001, 1st International Seminar on "Progress in Innovative Manufacturing Engineering", Ed. P. M. Lonardo, ISBN: 88-900559-0-1, Sestri Levante (GE), 20-22 Giugno, 2001, pag. 405-410.

[Atti08] Lanzetta, M.; Dini, G.; Tantussi, G.; Failli, F.; Sebastiani, F.; Gentile, S., Relazione Finale relativa alla Convenzione con la Fondazione Cassa di Risparmio di Pisa nella ricerca denominata: Sviluppo e realizzazione di sistemi di manipolazione/movimentazione e controllo dei prodotti nel comparto della pelle nel territorio pisano, Atti del Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Nucleare e della Produzione, n. 005 (2008), Università di Pisa, 30 Gennaio 2008, 93 pp.

[AS98II] Lanzetta, M.: Visione Tridimensionale nei Processi di Produzione - Applicazioni, Automazione e Strumentazione Elettronica Industriale, ANIPLA, Associazione Nazionale Italiana per l'Automazione, n. 3, Anno XLVI, Marzo 1998, pag. 137-144.

[AS96] Lanzetta, M.: Visione Stereoscopica con Reti Neurali, Automazione e Strumentazione Elettronica Industriale, ANIPLA, Associazione Nazionale Italiana per l'Automazione, n. 7, Anno XLIV, Luglio/Agosto 1996, pag. 107-116.

[Elot96] Lanzetta, M.: Calibrazione di un Sistema di Visione a Tre Telecamere Tramite Reti Neurali, Elettroottica '96, Atti del IV Convegno Nazionale "Strumentazione e Metodi di Misura Elettroottici", Milano, 29-31 Maggio, 1996, pag. 415-419.

[Icme98] Lanzetta, M.; Dini, G.: An Integrated Vision-Force System for Peg-In-Hole Assembly Operations, ICME '98, CIRP International Seminar on "Intelligent Computation in Manufacturing Engineering", Ed. R. Teti, Capri (NA), 1-3 Luglio, 1998, pag. 615-621.

[Amst96] Lanzetta, M.; Tantussi, G.: Monitoring Critical Points in Robot Operations with an Artificial Vision System, AMST'96, Atti del 4° Congresso Internazionale su "Advanced Manufacturing Systems and Technology", CISM Courses and Lectures N° 372, Ed. E. Kuljanic, ISBN:3-211-82808, Springer-Verlag, Wien New York, Udine, 2-3 Settembre, 1996, pag. 593-600.

[Adm97] Lanzetta, M.: Rasterisation of 2-D profiles with Unlimited Resolution through Artificial Vision Techniques: an Application to the Wood Industry, 10th ADM Conference, Atti del 10° Congresso Internazionale su "Design Tools and Methods in Industrial Engineering", Ed. Università di Firenze, ISBN: 88 7957 113-3, Firenze, 17-19 Settembre, 1997, pag. 311-316.

[Aitem99] Lanzetta, M.; Tantussi, G.; Santochi, M.: An Approach to On-line Welding Control through an Artificial Vision System, A.I.Te.M IV, Atti del IV Convegno della Associazione Italiana di Tecnologia Meccanica, Brescia, 13-15 Settembre, 1999, pag. 501-509.

[Ampt99] Lanzetta, M.; Tantussi, G.: A Flexible High-Resolution Vision Sensor for Tool Condition Monitoring, AMPT'99 and IMC16, Proceedings of the International Conference "Advances in Materials and Processing Technologies" and XVI Annual

Meeting of the Irish Manufacturing Committee, Dublin, Ireland, 3-4 August, 1999, vol. 1, pp. 569-593, Published by Dublin City University, Editors Prof. M.S.J. Hashmi and Dr. L. Looney.

[Iwk96] Lanzetta, M.: Tool Condition Monitoring Using an Artificial Vision System: Application of Blob Analysis to End Mills, 41. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, Band 1, Ed. Technische Universität Ilmenau, ISBN: 0943-7207, Ilmenau, Germania, 23-26 Settembre, 1996, pag. 581-586.

[ROC03] Tantussi, G.; Lanzetta, M.; Romoli, V., A Multi-axis Machine for Single Diamond Bead Testing, Roc Maquina-Dimension Stone Industry, num. 51, pp. 30-33, 2003.

[Aitem03] Tantussi, G.; Lanzetta, M.; Romoli, V., Diamond Wire Cutting of Marble: State of the Art, Modeling and Experiments with a New Testing Machine, A.I.Te.M VI, Proceedings of the 6th International Conference of the Italian Association of Mechanical Technology, Enhancing the Science of Manufacturing, vol. Unico, pp. 113-126, Gaeta (LT), Italy 2003.

[Aitem] Carrino L., Di Ilio A.M., Monno M., Tantussi G., Turchetta S.: Manufacturing technologies of ornamental stones, A.I.Te.M VI, Proceedings of the 6th International Conference of the Italian Association of Mechanical Technology, Enhancing the Science of Manufacturing, vol. Unico (CD-ROM), pp. 1-14, Gaeta (LT), Italy 2003 26.

[ICDS08a] Lanzetta, M.; Bernardelli, A.; Lenzi, G.; Tantussi, G.; Annoni, M.: Characterization of abrasive waterjet processed surfaces, Second International Congress Dimension Stones (ICDS) XXI Century challenges, Carrara, May 29-31, 2008, pp. 245-250 (6).

[ICDS08b] Lanzetta, M.; Fanti, F.; Tantussi, G.; Annoni, M.; Turchetta, S.: Characterization and measurement of stone engravings, Second International Congress Dimension Stones (ICDS) XXI Century challenges, Carrara, May 29-31, 2008, pp. 193-198 (6).

[MMC06] Lanzetta, M.; Gentile, S.; Tantussi, G.; Rizzello, F.; Coluccia, M.; Gaggio, G.: Pre-posa di lastre in materiale lapideo assistita da computer (Computer-aided pre-installation for stone slabs), Marmo Macchine Classic, n. 190, Anno 36°, 4° bim., 2006, Ed. Edizioni Promorama, pp. 102-112 (11).

[OCR] Lanzetta, M.: The Introduction of a New Functionality in Existing Industrial Products: the Case of OCR in an Artificial Vision System, Proceedings of the 10th International ADM Conference "Design Tools and Methods in Industrial Engineering", Florence (Italy), September 17th-19th, 1997, pp. 301-310 (10), Published by Università di Firenze, 1997, ISBN: 88 7957 113-3.

[PUNCH] Evers, C. and Kammerer, B., 1989, "Recognition of Punched Characters on Workpiece by Matching of Gradients with thin Reference Pattern", Proc. 6th Scandinavian Conf. on Image Anal., vol. 1, Finland, June 19-22, p. 577-584.

[SEG] Lee, S. W. and Lee, D. J., 1994, "A New Methodology for Gray Scale Character Segmentation and Recognition", IEEE Trans., vol. PAMI-16, n. 4, Apr.

[ORIENT] Duren, R., 1991, "A comparison of second order neural networks to transform-based method for translation- and orientation- invariant object recognition", Proc. of the 1991 IEEE Workshop, p. 198-207.

[GEN] Drucker, H. and Le Cun, Y., 1991 "Improving Generalisation Performance in Character Recognition", Proc. of the 1991 IEEE Workshop, Princeton (NJ), Sept. 30-Oct. 1, p. 198-207.

Pavlidis, T. and Mori, S., 1992, "Optical Character Recognition: The Issue", Proc. of the IEEE., vol. 80, n. 7, July, p. 1027-1057.

[ANN] Schantz, H. F., 1991, "An Overview of Neural OCR Networks", Journal of Information on System Management, vol. 8, n. 2, Spring, p. 22-27.

